

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
9. Dezember 2004 (09.12.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/107514 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **H01S 5/00**

Maximilian Josef [DE/AT]; Schwarzen 687, A-6861 Al-
berschwende (AT). JOHANNSEN, Ingo [DE/AT]; Weis-
senbildstrasse 11, A-6923 Lauterach (AT).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2004/005813

(74) Anwalt: KAMINSKI, Susanne; Büchel, Kaminski &
Partner, Austrasse 79, FL-9490 Vaduz (LI).

(22) Internationales Anmeldedatum:
28. Mai 2004 (28.05.2004)

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES,
FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE,
KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD,
MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG,
PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM,
ZW.

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
60/474,227 30. Mai 2003 (30.05.2003) US
01816/03 23. Oktober 2003 (23.10.2003) CH

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): HIGH Q LASER PRODUCTION GMBH [AT/AT];
Kaiser-Franz-Josef-Strasse 61, A-6845 Hohenems (AT).

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG,
ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU,
TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK,
EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT,

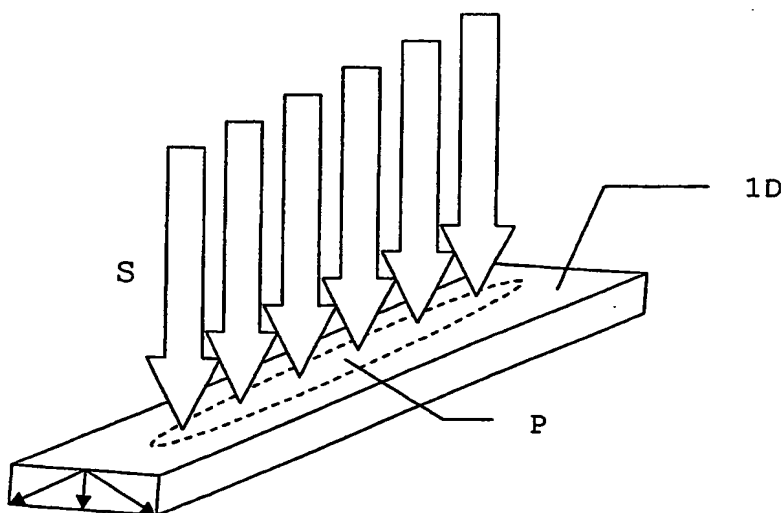
(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): KOPF, Daniel [AT/AT];
Sandholzerstrasse 14, A-6844 Altach (AT). LEDERER,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR PUMPING A LASER

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUM PUMPEN EINES LASERS



(57) Abstract: The invention relates to a method and devices for pumping a laser, and to a laser element, which is specially designed therefor and which contains laser-active material. In order to prevent the laser-active material from being subjected to excessive thermal stress, particularly during a thin disk setup, an, in essence, elongated pumped light spot is irradiated onto a laser medium placed on a temperature sink whereby producing a two-dimensional heat flow. This achieves an improved cooling and a reduction of the maximum temperature.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren und Vorrichtungen zum Pumpen eines Lasers sowie ein dafür speziell ausgebildetes Laserelement, das

laseraktives Material enthält. Zur Vermeidung von zu hoher thermischer Belastung des laseraktiven Materials, insbesondere bei einem Thin-Disk-Set-up, wird ein im wesentlichen länglicher Pumplichtfleck auf ein auf einer Temperatursenke angeordnetes Lasermedium eingestrahlt, so dass ein zweidimensionaler Wärmeffluss entsteht. Hierdurch werden eine verbesserte Kühlung und eine Reduzierung der maximalen Temperatur bewirkt.

BEST AVAILABLE COPY



RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

- ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Verfahren und Vorrichtung zum Pumpen eines Lasers

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Pumpen eines Lasers nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1, ein
5 Laserelement nach dem Oberbegriff des Anspruchs 9, sowie eine Laseranordnung nach dem Oberbegriff des Anspruchs 16.

Eine grundsätzliche Anforderung an Laser-Set-ups für industrielle wie wissenschaftliche Anwendungen ist die
10 möglichst hohe Einkopplung von Leistung in ein laseraktives Medium. Dies erfolgt bei einem weit verbreiteten Typ von Festkörper-Lasern durch Pumpen mittels Licht, das von einem oder mehreren Halbleiterlasern emittiert und auf den Festkörper mit oder aus laseraktivem Material geführt wird.
15 Beim Pumpen erwärmt sich der Festkörper, so daß eine erhöhte Leistungseinkopplung mit einer grundsätzlich unerwünschten Temperatursteigerung einhergeht.

Die Probleme durch thermische Belastungen entstehen bei
20 diesen Systemen einerseits durch Beschädigungen des Festkörpers selbst oder aber aufgrund unerwünschter Einflüsse auf das Strahlungsfeld im Festkörper. Ein Beispiel für einen solchen Effekt sind thermische Linsen.

25 Eine diese Effekte beeinflussende kritische Grösse ist die Wärmeleitung innerhalb des Festkörpers wie auch der Wärmetransport durch die Grenzflächen bzw. Grenzschichten des laseraktiven Festkörpers. Eine Standardlösung zur Verringerung der thermischen Effekte stellt der Thin-Disk-
30 Laser dar, wie er beispielsweise aus der EP 0 632 551 B1 bekannt ist, wobei dieses Dokument hiermit als über die Referenzierung einbezogen angesehen wird.

Bei solchen Lasern wird das Lasermedium als flache Scheibe ausgebildet und mit einer seiner Flachseiten auf eine Temperatursenke aufgebracht, die meist als massives Kühlelement ausgebildet ist. Durch das günstige Verhältnis von Oberfläche zu Volumen kann ein Wärmetransport auch bei hohen Transportleistungen erreicht werden, der eine hinreichende Kühlung des Lasermediums bewirkt und somit negative Auswirkungen auf Material und Strahlungsfeld verhindert. Dabei bildet sich durch die flächenhafte Ausgestaltung des Materials ein Temperaturgradient aus, der im Kernbereich des Strahlungsfeldes parallel zu dessen Ausbreitungsrichtung verläuft. Damit kann eine vergleichsweise Homogenität der Temperatur über einen grossen Bereich des Strahlquerschnittes erreicht werden, so daß der Wärmefluß im wesentlichen eindimensional verläuft und thermische Linsen vermieden werden. Die zum Pumpen solcher Laser verwendeten Strahlquerschnitte werden zur Erzielung dieses eindimensionalen Wärmeflusses rund ausgestaltet und an die Geometrie des Lasermaterials angepasst.

Lösungen des Stand der Technik, wie sie bspw. auch aus „Widely tunable pulse durations from a passively mode-locked thin-disk Yb:YAG laser“, F. Brunner et al. (Optics Letters 26, No. 2, Seiten 379-381) oder „60-W average power in 810-fs pulses from a thin-disk Yb:YAG laser“, E. Innerhofer et al. (Optics Letters 28, No. 5, Seiten 367-369) bekannt sind, betonen die Eindimensionalität des Wärmeflusses und bestreben eine Optimierung des Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen, indem eine Dimension des Lasermediums möglichst klein, die beiden anderen Dimensionen hingegen möglichst gross, zumindest aber deutlich größer als die Dicke des Lasermediums,

gehalten werden. Die beiden Dokumente werden hiermit als mittels Referenzierung vollumfänglich einbezogen angesehen.

5 Damit erfolgt nach dem Stand der Technik eine Auslegung des Lasers zur Erzielung niedriger Temperaturen bzw. eines günstigen Wärmeflusses vor allem durch eine Verringerung der Schichtdicke des Lasermediums bei einem geometrisch angepaßten Pumplichtfleck.

10 Ein weiteres Problem stellt die Fokussierung der Pumplichtquellen in einen runden Fleck dar. Die Abbildung vieler Pumplaser in einen Fleck erfordert einen vergleichsweise grossen apparativen Aufwand, der auch mit Schwierigkeiten der Justierung verbunden ist.

15 Ein weiteres Problem besteht in der Handhabung der dünnen, plättchenartigen Lasermedien beim Aufbringungsvorgang, insbesondere da eine weiter zunehmende Verringerung der Dicke auch eine verringerte Resistenz gegenüber
20 mechanischen Beanspruchungen beinhaltet.

Eine Aufgabe besteht somit darin, eine gegenüber dem Stand der Technik geringere Temperatur des Lasermediums bei gleicher eingestrahelter Leistung und Leistungsdichte - und
25 somit gleichem rechnerischen Verstärkungsfaktor - oder aber eine höhere einstrahlbare Leistung bei gleicher Temperatur zu erreichen, ohne daß nicht tolerierbare oder nicht berücksichtigbare thermische Effekte auftreten.

30 Eine weitere Aufgabe besteht in der Vereinfachung der Strahlführung zur Abbildung der Pumplichtquellen in einem Pumplichtfleck.

Eine weitere Aufgabe besteht in der Vereinfachung des Aufbaus des Lasers, insbesondere in der Verringerung der notwendigen Komponenten und der Vereinfachung der Ausrichtung der Komponenten.

5

Eine weitere Aufgabe besteht in der Erhöhung der Stabilität des Lasermediums, insbesondere in Hinblick auf die Handhabung der Komponenten während der Fertigung.

- 10 Diese Aufgaben werden erfindungsgemäss durch Merkmale des Anspruchs 1, 9, bzw. 16 oder durch Merkmale der Unteransprüche gelöst bzw. die Lösungen weitergebildet.

Erfindungsgemäss wird das Lasermedium in einem Thin-disk-Laser durch einen länglichen bzw. elliptischen Pumplichtfleck ausgeleuchtet. Dieser Pumplichtfleck weist eine grundsätzlich längliche Form auf, wobei das Verhältnis von Länge zu Breite bei 2:1, 3:1, 5:1, 10:1 oder noch höher liegen kann. Insbesondere kann auch ein High-Aspect-Ratio-Laserspot erfindungsgemäss verwendet werden. Durch den länglichen Pumplichtfleck wird ein zweidimensionaler Wärmefluß bewirkt, der im Vergleich zu Lösungen des Stands der Technik zu einer Verringerung der Maximaltemperatur führt.

25

In Anpassung an die Geometrie des Pumplichtflecks kann auch der Festkörper als ein länglicher, flächiger oder barrenartiger Festkörper ausgebildet werden, wobei jedoch grundsätzlich auch Abweichungen zwischen den Geometrien von Pumplichtfleck und Lasermedium die erfindungsgemässe Wirkung ermöglichen. Für eine erfindungsgemässe Anpassung an die längliche Pumplichtgeometrie wird wenigstens eine erste Dimension des Festkörpers deutlich grösser als die Dicke des Festkörpers gewählt. Die andere Dimension ist zur

30

Erzielung einer zweidimensionalen Kühlung deutlich geringer als die erste Dimension. Bezogen auf die Dicke des Festkörpers kann diese Dimension kleiner, gleich oder größer als die Dicke des Festkörpers gewählt werden. Eine
5 Verbesserung der Kühlung wird somit erfindungsgemäss erreicht, indem eine der beiden flächenhaften Dimensionen der Kühloberfläche gegenüber der anderen stark vergrößert wird. Durch erfindungsgemäss geeignete Wahl der Dimensionen des Lasermediums kann damit bei gleicher Leistung die
10 maximale Temperatur gegenüber z.B. der scheibchenförmigen Form des Lasermediums stark verringert werden. Dieses Lasermedium wird in an sich bekannter Weise auf eine Temperatursenke aufgebracht. Zwischen Temperatursenke und Lasermedium kann eine reflektierende Schicht eingebracht
15 werden. Gleichfalls kann das Lasermedium auf der der Kühlung abgewandten Seite ein oder mehrere Schichten, bspw. zur Reflexverminderung, tragen.

Auf das Lasermedium wird Pumplicht in Form eines
20 Pumplichtfleckes abgebildet, wobei Geometrien der Fläche des Lasermediums und des Pumplichtfleckes vorteilhaft aufeinander abgestimmt sein können. Dabei kann der Pumplichtfleck auch aus der Abbildung einzelner Emitter zusammengesetzt sein oder durch mehrfache Reflexion
25 gebildet werden. Ein Beispiel für eine geeignete Überlagerung der Strahlung verschiedener Emitter wird in der WO 00/77893 bzw. US Patentanmeldung No. 10/006,396 geoffenbart. Eine geeignete Lösung zur Erzeugung einer mehrfachen Reflexion wird in der US Provisional
30 Patentanmeldung No. 60/442,917 beschrieben. Ein darin beschriebenes erfindungsgemässes Faltelement weist wenigstens zwei aufeinander zulaufende bzw. verkippte reflektierende Ebenen auf, zwischen denen der Strahlengang geführt wird. Dabei können diese Ebenen sowohl

Aussenflächen mehrerer spiegelnder Elemente als auch die Innenseiten eines einzigen Elements darstellen. D.h. die Reflexion findet an einem Übergang von wenigstens zwei Medien unterschiedlicher optischer Brechzahl statt. Alle
5 aufgeführten Dokumente werden hiermit als mittels Referenzierung vollumfänglich einbezogen angesehen.

Hinzu kommt, daß durch die längliche Form des Pumplichtfleckes eine homogene Temperatur im größten Teil
10 des Flecks entsteht, die einen Wärmetransport in dessen Längsrichtung verhindert. Der Wärme fluß erfolgt somit im wesentlichen quer zur Längsrichtung des Lasermediums bzw. zur Temperatursenke und damit zweidimensional. Im Vergleich zu einer runden Geometrie des Pumplichtfleckes ist die
15 Maximaltemperatur stark erniedrigt, so daß bei gleicher Leistung auch quer zur Strahlrichtung eine in der Größenordnung der runden Geometrie liegende Temperaturdifferenz pro Längeneinheit auftritt, so daß durch die thermische Linsenbildung auftretende Effekte
20 vernachlässigbar sind oder zumindest kompensierbar bleiben. So kann beispielsweise mit einem länglichen, bspw. elliptischen, Pumpspot von 10 mm Länge und 0,1 mm Breite die gleiche Fläche eines runden Pumpspots von 1 mm² jedoch bei verbesserter Kühlung genutzt werden. Zwar wird bei
25 einer erfindungsgemäßen länglichen Ausgestaltung von Lasermedium und gepumpter bzw. ausgeleuchteter Fläche der Effekt rein flächenhafter Kühlung verringert, jedoch kann durch die stark verringerte Maximaltemperatur auch bei mehrdimensionalem Wärme fluß die Auswirkung von thermischen
30 Linsen gering gehalten werden.

Zur weiteren Verbesserung der Kühlwirkung und zur Erhöhung der mechanischen Belastbarkeit kann auch das Lasermedium auf der der Temperatursenke entgegengesetzten Seite eine

weitere Schicht aus einem Material mit dem gleichen Brechungsindex des Lasermediums aufgebracht werden. Vorteilhaft ist eine Schicht aus dem gleichen Material des laseraktiven Mediums, wobei dieses jedoch nicht dotiert ist. Eine Verbindung beider Schichten kann durch eine Diffusionsbindung erfolgen. Durch eine solche weitere Schicht erfolgt auch ein verbesserter Wärmetransport durch die Kühloberfläche in einer der Temperatursenke entgegengesetzten Richtung, so daß die Kühlung nochmals verbessert und eine weitere Reduzierung der Maximaltemperatur erreicht wird. Daneben wird die mechanische Stabilität des Lasermediums erhöht und dadurch der Herstellprozeß verbessert bzw. vorteilhafter gestaltbar.

15

Die erfindungsgemäße Dimensionierung des Pumplichtflecks und die Anpassung von Pumplichtfleck und Lasermedium sowie damit realisierbare erfindungsgemäße Laseranordnungen werden nachfolgend anhand von in der Zeichnung schematisch dargestellten Ausführungsbeispielen rein beispielhaft näher beschrieben. Im einzelnen zeigen

20

Fig.1 die schematische Darstellung von Lasermedium und Pumplichtstrahl einer erfindungsgemäßen Laseranordnung;

25

Fig.2a-b die schematische Darstellung der Pumplichtgeometrien bei der Abbildung auf das Lasermedium;

30

Fig.3 die schematische Darstellung eines Strahlgangs mit multipler Reflexion in einer erfindungsgemäßen Laseranordnung;

- Fig.4 die schematische Darstellung der Abbildung von Pumplicht auf das Lasermedium für eine Ausführungsform der erfindungsgemässen Laseranordnung mit multipler Reflexion;
- 5
- Fig.5a-b die schematische Darstellung von erfindungsgemässen Schichtaufbauten des zu pumpenden Festkörpers;
- 10
- Fig.6 die schematische Darstellung von vorteilhaften Formen des erfindungsgemäss zu pumpenden Festkörpers;
- 15
- Fig.7 die schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform des erfindungsgemäss zu pumpenden Festkörpers;
- 20
- Fig.8 die schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform des erfindungsgemäss zu pumpenden Festkörpers;
- 25
- Fig.9 die Modellierung eines Festkörpers mit Pumplichtfleck nach dem Stand der Technik mittels der Methode der finiten Elemente;
- Fig.10 den Temperaturverlauf in X-Richtung durch den Festkörper nach Fig.9;
- 30
- Fig.11 den Temperaturverlauf in Y-Richtung durch den Festkörper nach Fig.9;
- Fig.12 den Temperaturverlauf in Z-Richtung durch den Festkörper nach Fig.9;

- Fig.13 die Modellierung eines ersten Festkörpers mit erfindungsgemäsem Pumplichtfleck mittels der Methode der finiten Elemente;
- 5 Fig.14 den Temperaturverlauf in X-Richtung durch den Festkörper nach Fig.13;
- Fig.15 den Temperaturverlauf in Y-Richtung durch den Festkörper nach Fig.13;
- 10 Fig.16 den Temperaturverlauf in Z-Richtung durch den Festkörper nach Fig.13;
- Fig.17 die Modellierung eines erfindungsgemäßen zweiten Festkörpers mit erfindungsgemäsem Pumplichtfleck mittels der Methode der finiten Elemente;
- 15 Fig.18 den Temperaturverlauf in X-Richtung durch den Festkörper nach Fig.17;
- 20 Fig.19 den Temperaturverlauf in Y-Richtung durch den Festkörper nach Fig.17;
- Fig.20 den Temperaturverlauf in Z-Richtung durch den Festkörper nach Fig.17 und
- 25 Fig.21 die schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Laseranordnung.
- 30 In Fig.1 werden ein Lasermedium 1 und ein Pumplichtstrahl S für eine erfindungsgemäße Laseranordnung dargestellt. Dabei ist das dünne Lasermedium 1 auf einer Temperatursenke 2 angebracht, die als gekühlter Festkörper ausgebildet ist. Der Teilstrahl S eines Pumplichtstrahls fällt unter einem

Winkel (z.B.: Brewster-Winkel) auf das Lasermedium 1 und wird nach Passieren desselben von einer Reflexionsschicht 3, die zwischen Lasermedium 1 und Temperatursenke 2 angebracht ist, reflektiert. An einem Spiegel 4 wird der Pumplichtstrahl S in sich zurück reflektiert und passiert erneut das Lasermedium 1 mit einer Reflexion an der Reflexionsschicht 3.

Mögliche Beispiele von erfindungsgemäß geeigneten Pumplichtgeometrien zeigen die Fig.2a-b. Der auf das Lasermedium 1 abgebildete Pumplichtfleck in Fig.2a setzt sich aus einer aneinandergereihten Folge von Projektionen zusammen, die zusammen einen Pumplichtfleck P definieren, wobei diese entweder von verschiedenen Emitttern bzw. Lichtquellen stammen oder aber auch durch mehrfache Abbildung der Strahlung einer Lichtquelle, z.B. durch mehrfache Reflexionen, erzeugt werden können. In ihrer Gesamtheit bilden diese einzelnen Projektionen, die hier nur rein exemplarisch als rund und mit nur geringem Überlapp dargestellt werden, einen gemeinsamen und im wesentlichen länglichen bzw. elliptischen Pumplichtfleck P, welcher vorteilhafterweise der Geometrie des Lasermediums 1 folgt. Fig.2b zeigt als weitere Alternative die Ausbildung eines einzelnen, homogenen Pumplichtflecks P, der beispielsweise durch die entsprechend geformte Projektion der 5'-Strahlung eines einzigen Emitters gebildet werden kann. Vorteilhafterweise kann aber das identisch geformte Licht mehrerer Emittter zu einem homogenen Pumplichtfleck überlagert werden. Eine hierfür geeignete Lösung wird in der WO 00/77893 beschrieben und in Fig.21 weiter ausgeführt. Besonders vorteilhaft kann auch die ohnehin längliche Anordnung von Halbleiterlasern in einem ein- oder mehrzeiligen Linear-Array ausgenutzt werden, um einen länglichen Pumplichtfleck zu erzeugen.

In Fig.3 wird ein Beispiel der Verwendung mehrfacher Reflexionen zur Erzeugung eines länglichen Pumplichtflecks P erläutert. Wie beispielsweise in der US Provisional Patentanmeldung No. 60/442,917 geoffenbart, kann durch eine gegenüber einer anderen Oberfläche verkippte Spiegelfläche 4' eine mehrfache Reflexion mit veränderlichem Abstand der Reflexionspunkte erreicht werden, die nach einer gewissen Anzahl von Reflexionen zur Umkehr der Richtung führt. In diesem Beispiel erfolgen die Reflexionen zwischen der Spiegelfläche 4' und der Reflexionsschicht 3, die wiederum zwischen Lasermedium 1 und Temperatursenke 2 angebracht ist. Der Pumplichtstrahl S wird bei diesem Setup von einer Seite ein- und wieder ausgekoppelt, so daß eine konstruktiv vorteilhafte Anordnung möglich wird. Alternativ kann aber auch die Spiegelfläche 4' planparallel zur Reflexionsschicht 3 angeordnet sein, so daß eine Richtungsumkehr des Teilstrahls S durch einen weiteren Spiegel in an sich bekannter Weise erfolgt.

In analoger Weise können auch der Lasermode und damit das zu verstärkende Strahlungsfeld mehrfach durch das Lasermedium geführt werden und somit mehrfache Verstärkung erfahren.

Fig.4 zeigt schematisch die Ausbildung eines erfindungsgemäßen Pumplichtflecks P auf einem Lasermedium 1 bei einer Anordnung nach Fig.3. Die einzelnen Projektionen 5'' bzw. Reflexionen erfolgen in diesem Beispiel mit veränderlichem Abstand, so daß die dadurch gebildeten einzelnen Projektionen 5'' unterschiedliche Entfernungen zueinander aufweisen. Durch geeignete Wahl von Strahldurchmesser, Strahlkonvergenz und -divergenz, Entfernung und Winkel der reflektierenden Flächen

zueinander kann die Folge der Reflexionspunkte bis hin zu einem weitgehenden Überlapp variiert werden, so dass ein weitgehend homogener Pumplichtfleck P entsteht.

- 5 Ein möglicher Aufbau des das Lasermedium enthaltenden Festkörpers zeigen Fig.5a-b. In Fig.5a besteht der Aufbau in einer auf der Temperatursenke 2 aufgebrachten Schichtfolge aus Reflexionsschicht 3, dotiertem Festkörpermateri-
10 al 1a und nicht-dotiertem Festkörpermaterial 1b. Die beiden Festkörpermaterialien können als separate Elemente durch Diffusionsbindung (Diffusion Bonding) oder andere Verbindungsverfahren miteinander verbunden werden. Eine Erweiterung der Schichtfolge wird in Fig.5b dargestellt. Hier wird zusätzlich auf das nicht-
15 dotierte Festkörpermateri al 1b eine zusätzlich reflexmindernde und/oder abriebfeste Schicht 1c aufgebracht. Gegebenenfalls kann diese Schicht 1c auch die Funktion der reflektierenden Fläche aus Fig.3 übernehmen, so daß die multiple Reflexion vollständig im Inneren des
20 Festkörpers erfolgt.

- In Fig.6 werden schematisch verschiedene geometrische Ausbildungsformen eines das Lasermedium beinhaltenden Festkörpers dargestellt. Dargestellt werden zwei rein
25 exemplarische Ausführungsformen des erfindungsgemäßen laseraktiven Festkörpers 1A-1B sowie eine weitere Ausführungsform eines Festkörpers 1C, wobei diese in ihrer Orientierung bezüglich der Folge von einfallenden Teilstrahlen S als Pumplichtstrahls dargestellt werden. Die
30 erste Ausführungsform des Festkörpers 1A ist plättchenförmig ausgebildet, wobei die beiden Kanten, welche die dem Pumplichtstrahl zugewandte Einstrahlfläche definieren, größer als die Dicke des Festkörpers 1A sind. Eine zweite Ausführungsform des Festkörpers 1B besitzt zwei

Kanten gleicher Länge, wobei die dritte Kante eine vergleichsweise grosse Länge aufweist, so daß der Festkörper einem Barren mit quadratischem Querschnitt entspricht. Bei der dritten Ausführungsform des Festkörpers 5 1C ist eine der beiden Kanten, welche die dem Pumplichtstrahl zugewandte Einstrahlfläche definieren, sehr viel größer als die Dicke des Festkörpers 1C wohingegen die andere Kante geringfügig kleiner als diese Dicke ist. Damit entspricht der Festkörper 1C in seiner Orientierung 10 gegenüber den Teilstrahlen S einem Barren mit rechteckigem Querschnitt, der auf seiner Schmalseite steht. Allerdings nimmt die erfindungsgemäße Wirkung mit zunehmender Abweichung von einem flächigen Kontakt - wie er bei einer plättchenförmigen ersten Ausführungsform des Festkörpers 1A 15 entsteht - ab, so dass für die dritte Ausführungsform mit zunehmendem Verhältnis von Seiten- zu Standfläche die erfindungsgemäße Wirkung reduziert wird und schliesslich nur noch ein vorwiegend eindimensionaler Wärme flu ß folgt.

20 Fig.7 stellt schematisch die besonders vorteilhafte Anpassung von Pumplichtfleck P und Festkörper 1D dar. Die Geometrie des Festkörpers 1D wird so gewählt, dass sie der Geometrie des Pumplichtflecks P im wesentlichen entspricht. Dadurch kann eine weitgehende Ausleuchtung des Festkörpers 25 1D durch eine Folge von Teilstrahlen S als Pumplichtstrahl und eine erfindungsgemäße Kühlwirkung erreicht werden. Gleichzeitig erlaubt eine solche Anpassung eine kompakte bzw. flache Bauweise und eine direkte Abbildung von linearen Anordnungen der Emitter oder einer linearen 30 Abstrahlgeometrie eines einzigen Emitters, so dass eine geringe Komplexität des Aufbaus möglich wird.

Fig.8 zeigt die schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform des erfindungsgemäß zu pumpenden

Festkörpers. Bei dieser Ausführungsform wird auf eine weitgehende Anpassung der Geometrien von zu pumpenden Festkörper 1E und Pumplichtfleck P verzichtet. Bei dieser Ausführungsform wird nur ein Teil des Festkörpers 1E durch
5 eine Folge von Teilstrahlen S als Pumplicht ausgeleuchtet. Durch eine solche Auslegung kann bewirkt werden, dass der horizontale und quer zur Längsrichtung erfolgende Temperaturabfall pro Längeneinheit des Pumplichtflecks P geringer gehalten wird. Allerdings folgen für diese
10 Ausführungsform bei gleicher Grösse des Pumplichtflecks P grössere Abmessungen, so dass im Vergleich zur ersten Ausführungsform nach Fig.7 auf Möglichkeiten zur kompakten Gestaltung des Lasers verzichtet werden muß.

15 Die in den Fig. 9-20 dargestellten Modelle bzw. Ergebnisse wurden mit der Methode der finiten Elemente berechnet. Die Berechnungen erfolgten unter Verwendung des Programms „Flex PDE 3D“. Dabei wurden nur die Temperaturverteilungen berechnet und Spannungen oder Verbiegungen vernachlässigt.
20 Das Berechnungsgitter wird vom Programm selbst festgelegt. Das Simulationsproblem wurde halbiert, d.h. die Hälfte des Materials wurde aufgrund der Spiegelsymmetrie vernachlässigt. Als Material des Festkörpers wurde mit 1% Neodym dotiertes Vanadat zugrundegelegt.

25

Bemassung des Festkörpers:

halbe Länge 7.5mm (Fig.13 und Fig.17), 2.5mm (Fig.9)

Breite 1.5mm (Fig.13 und Fig.17), 5mm (Fig.9)

30 Höhe 0.3mm (+0.6mm für Fig.17)

Die kontaktierte Kühlfläche wird auf eine Temperatur fixiert, die anderen Flächen sind hinsichtlich der Temperatur frei und ungekühlt. Daraus folgt, dass sämtliche

15

Temperaturen der Simulation die Differenz zur
Kühltemperatur angeben. Zur Berechnung der
dreidimensionalen Pumplichtverteilung im Material wurde das
Programm MATLAB herangezogen. Diese wurde nach dem
5 Beerschen Gesetz mit Reflexion an der Kühlseite und unter
Vernachlässigung des Ausbleicheffekts durchgeführt.

Als Parameter wurden angenommen:

- 10 Pumplänge 10mm (Fig.13 und Fig.17), 1mm (Fig.9)
Pumpbreite 0.1mm (Fig.13 und Fig.17), 1mm (Fig.9)
Absorptionskoeffizient $\alpha = 15\text{cm}^{-1}$
Pumpleistung 200W (absorbiert 120W)
Wärmewirkungsgrad $\eta_h = 35\%$, also Wärmeleistung 42 W
15 Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 5.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

Alle Parameter wurden als temperaturunabhängig angenommen.

Die Fig.9-12 stellen die Verhältnisse bei der Simulation
20 eines Festkörpers und Pumplichtstrahls zugehöriger
Geometrie des Stands der Technik dar. Die Grössenangaben
erfolgen in mm, die Temperaturangaben in Grad Kelvin als
Differenz gegenüber der Temperatursenke.

25 In Fig.9 ist das der Simulation zugrundeliegende Modell
nach der Methode der finiten Elemente dargestellt.
Betrachtet wird ein Lasermedium eines Thin-Disk-Lasers mit
quadratischem Querschnitt auf den ein kreisrunder
Pumplichtstrahl eingestrahlt wird. Das Lasermedium ist ein
30 homogener und dotierter Festkörper. Aus Symmetriegründen
ist es hinreichend - wie dargestellt - nur eine Hälfte des
Festkörpers zu simulieren. Angegeben sind die drei Achsen
des Festkörpers.

Fig. 10 zeigt den Temperaturverlauf auf der Oberfläche des Festkörpers gem. Fig.9 entlang der X-Achse. Das Zentrum des Pumplichtflecks heizt sich im dargestellten Beispiel bis
5 auf fast 1000° Kelvin als Differenz gegenüber der Temperatursenke auf.

Fig.11 zeigt den Temperaturverlauf auf der Oberfläche des Festkörpers gem. Fig.9 entlang der Y-Achse. Da nur eine
10 Hälfte der symmetrischen Anordnung simuliert wurde, entspricht der Temperaturverlauf im wesentlichen der rechten Hälfte des Temperaturverlaufs gemäss Fig.10.

Fig. 12 zeigt den Temperaturverlauf im Inneren des
15 Festkörpers gem. Fig.9 entlang der Z-Achse.

Die Fig.13-16 stellen die Verhältnisse bei der Simulation einer ersten Ausführungsform eines Festkörpers und zugehörigen Pumplichtstrahls in einer erfindungsgemässen
20 Laseranordnung dar. Das Lasermedium ist ein homogener und dotierter Festkörper. Die Grössenangaben erfolgen in mm, die Temperaturangaben in Grad Kelvin als Differenz gegenüber der Temperatursenke.

25 In Fig.13 ist das der Simulation zugrundeliegende Modell nach der Methode der finiten Elemente dargestellt. Betrachtet wird eine erste Ausführungsform eines Lasermediums für einen erfindungsgemässen Thin-Disk-Laser, wobei das Lasermedium länglich ausgebildet ist und einen
30 rechteckigen Querschnitt aufweist. Auf das Lasermedium als Festkörper wird ein länglicher bzw. elliptischer Pumplichtstrahl eingestrahlt. Aus Symmetriegründen ist es hinreichend - wie dargestellt - nur eine Hälfte des Festkörpers zu simulieren. Angegeben sind die drei Achsen

des Festkörpers. Sowohl die Dimension in X- als auch in Y-Richtung ist größer als die Dicke des Festkörpers (Z-Richtung). Die eingestrahlte Gesamtleistung entspricht der des Beispiels von Fig.9-12.

5

Fig. 14 zeigt den Temperaturverlauf auf der Oberfläche des Festkörpers gem. Fig.13 entlang der X-Achse. Das Zentrum des Pumplichtflecks heizt sich im dargestellten Beispiel nur noch bis auf ca. 270° Kelvin als Differenz gegenüber der Temperatursenke auf.

10

Fig.15 zeigt den Temperaturverlauf auf der Oberfläche des Festkörpers gem. Fig.13 entlang der Y-Achse. Im Gegensatz zum Temperaturverlauf gemäss Fig.11 bildet sich bei der erfindungsgemäßen Ausführungsform in Längsrichtung ein Bereich im wesentlichen konstanter und deutlich geringerer Temperatur aus.

15

Fig. 16 zeigt den Temperaturverlauf im Inneren des Festkörpers gem. Fig.13 entlang der Z-Achse.

20

Die Fig.17-20 stellen die Verhältnisse bei der Simulation einer zweiten Ausführungsform eines Festkörpers und zugehörigen Pumplichtstrahls in einer erfindungsgemäßen Laseranordnung dar. Das Lasermedium ist ein heterogener Festkörper mit einem dotierten und einem nicht-dotierten Bereich. Die Grössenangaben erfolgen in mm, die Temperaturangaben in Grad Kelvin als Differenz gegenüber der Temperatursenke.

25

30

In Fig.17 ist das der Simulation zugrundeliegende Modell nach der Methode der finiten Elemente dargestellt. Betrachtet wird eine zweite Ausführungsform eines Lasermediums für einen erfindungsgemässen Thin-Disk-Laser,

wobei das Lasermedium länglich ausgebildet ist und einen rechteckigen Querschnitt aufweist. Im Gegensatz zur Fig.13 besteht der Festkörper jedoch aus einem ersten Bereich aus dotiertem Material auf den ein zweiter Bereich aus nicht-dotiertem oder einem anderen nicht-aktiven Material aufgebracht wurde. Auf die Oberfläche dieses Gesamtfestkörpers wird ein länglicher bzw. elliptischer Pumplichtstrahl eingestrahlt. Aus Symmetriegründen ist es hinreichend - wie dargestellt - nur eine Hälfte des Festkörpers zu simulieren. Angegeben sind die drei Achsen des Festkörpers. Sowohl die Dimension in X- als auch in Y-Richtung ist größer als die Dicke des Festkörpers (Z-Richtung). Die eingestrahlte Gesamtleistung und Leistungsdichte - und somit der rechnerische Kleinsignal-Verstärkungsfaktor - entsprechen der des Beispiels von Fig.9-12 bzw. von Fig.13-16.

Fig. 18 zeigt den Temperaturverlauf im Maximum im Inneren des Festkörpers gem. Fig.17 entlang der X-Achse. Das Zentrum des Pumplichtflecks heizt sich im dargestellten Beispiel nur noch bis auf ca. 190° Kelvin als Differenz gegenüber der Temperatursenke auf.

Fig.19 zeigt den Temperaturverlauf im Maximum im Inneren des Festkörpers gem. Fig.17 entlang der Y-Achse. Im Gegensatz zum Temperaturverlauf gemäss Fig.11 bildet sich auch hier bei der erfindungsgemäßen Ausführungsform in Längsrichtung ein Bereich im wesentlichen konstanter Temperatur aus.

30

Fig. 20 zeigt den Temperaturverlauf im Inneren des Festkörpers gem. Fig.17 entlang der Z-Achse. Durch den Bereich undotierten Materials wird eine verbesserte

Abkühlung bewirkt. Das Temperaturmaximum liegt nun im Inneren des Festkörpers.

In Fig.21 wird ein Beispiel für eine erfindungsgemäße
5 Laseranordnung dargestellt. Als Lichtquelle zum Pumpen des
Lasermediums 1 werden Laserdioden 6 als Emitter bzw.
Lichtquellen von Teilstrahlen verwendet, die in einem Array
linear angeordnet sind. Der jeweilige Teilstrahl S dieser
Laserdioden 6 wird über ein erstes optisches Element 7 und
10 ein zweites optisches Element 8 als Pumplichtstrahl auf das
auf der Temperatursenke 2 angebrachte Lasermedium 1
abgebildet. Bei diesem Aufbau wird das Licht jeder
Laserdiode 6 so in einen gemeinsamen länglichen
Pumplichtfleck abgebildet, daß die Lichtflecke weitgehend
15 überlappen und ein Ausfall eines einzelnen Emitters nicht
die Struktur des Pumpflecks verändert. Durch die Divergenz
des von der Laserdiode 6 ausgehenden Lichts und der
Umlenkung durch das zweite optische Element 8 kann ein
länglicher Pumplichtfleck auf dem Lasermedium 1 erzeugt
20 werden, welcher der Form des Lasermediums 1 entspricht.
Dieser Aufbau stellt nur ein mögliches Beispiel der
Strahlerzeugung und -führung dar. Insbesondere kann auch
ein Strahlgang unter Verwendung von Mehrfachreflexionen mit
diesem Konzept verwirklicht werden. Auch kann die lineare
25 Struktur eines Laserarrays genutzt werden, um direkt einen
länglichen Pumplichtfleck zu erzeugen. Als erstes und
zweites optisches Element können beispielsweise
Zylinderlinsen verwendet werden, wobei aber auch andere
Ausführungsformen z.B. Hologrammen oder gradientenoptischen
30 Komponenten realisierbar sind.

Es versteht sich, dass die dargestellten Figuren eine von
vielen Ausführungsformen darstellen und der Fachmann
alternative Realisierungsformen des Laseraufbaus, z.B.

unter Verwendung anderer Laser-Set-ups oder Resonatorkomponenten, ableiten kann. Insbesondere ist es möglich, die Strahlführung oder den Querschnitt des Pumplichtes über die angegebenen Beispiele hinaus anders zu
5 gestalten, beispielsweise durch eine geeignete Ausformung oder Anordnung von reflektierenden Flächen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Pumpen eines Lasers mit
- einem Lasermedium (1), insbesondere mit Thin-Disk-Geometrie,
 - einer Temperatursenke (2), auf welcher das Lasermedium (1) angeordnet ist und
 - wenigstens einer Lichtquelle zur Erzeugung eines Teilstrahls (S),
- mit den Schritten
- Erzeugen des Pumplichts aus dem wenigstens einen Teilstrahl der wenigstens einen Lichtquelle,
 - Einstrahlen des Pumplichts auf eine der Temperatursenke (2) gegenüber liegende Eintrittsfläche des Lasermediums (1),
- dadurch gekennzeichnet, dass**
- beim Einstrahlen des Pumplichts auf der Eintrittsfläche ein Pumplichtfleck (P) mit einem Verhältnis von Länge zu Breite von wenigstens 2:1 erzeugt wird, wobei der Pumplichtfleck (P) durch einen einzigen Teilstrahl (S) oder die Kombination von mehreren Teilstrahlen (S) gebildet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1,
- dadurch gekennzeichnet, daß**
- beim Einstrahlen der Pumplichtfleck (P) durch das Aneinanderreihen der Teilstrahlen (S) mehrerer Lichtquellen gebildet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1,
- dadurch gekennzeichnet, daß**

beim Einstrahlen der Pumplichtfleck (P) durch die Teilstrahlen mehrerer Lichtquellen mit einem weitgehenden Überlappen der Teilstrahlen (S) gebildet wird.

5

4. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, daß
beim Einstrahlen der Pumplichtfleck (P) durch das Aneinanderreihen von multiplen Projektionen (5'') des Teilstrahls (S) der Lichtquelle gebildet wird.

10

5. Verfahren nach Anspruch 4,
dadurch gekennzeichnet, daß
die multiplen Projektionen (5'') durch eine mehrfache Reflexion des Teilstrahls (S) der Lichtquelle an einer reflektierenden Fläche (4') bewirkt werden.

15

6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, daß
beim Einstrahlen der Pumplichtfleck (P) mit einem Verhältnis von Länge zu Breite von wenigstens 3:1, 5:1 oder 10:1 erzeugt wird.

20

7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, daß
nach einem Reflektieren des Pumplichts an einer Grenzfläche zur Temperatursenke das Pumplicht eine Rückreflexion erfährt.

25

8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, daß

30

innerhalb des Lasermediums (1) eine mehrfache Reflexion des Pumplichts erfolgt.

9. Laserelement mit

- 5 - einer Temperatursenke (2) und
 - einer ersten Komponente (1a) aus laseraktivem Material,

wobei die erste Komponente (1a) und die
Temperatursenke (2) eine wärmeleitende Verbindung,
10 insbesondere durch unmittelbaren flächigen Kontakt,
 aufweisen,

gekennzeichnet durch

einen rechteckigen Querschnitt der wärmeleitenden
Verbindung, insbesondere mit einem Verhältnis von
15 Länge zu Breite von wenigstens 2:1.

10. Laserelement, insbesondere nach Anspruch 9, mit

- einer Temperatursenke (2) und
 - einer ersten Komponente (1a) aus laseraktivem
20 Material,

wobei die erste Komponente (1a) und die
Temperatursenke (2) miteinander wärmeleitend verbunden
sind,

gekennzeichnet durch

25 eine zweite Komponente (1b) aus einem Material, das
 einen zum laseraktiven Material identischen
 Brechungsindex aufweist, wobei die zweite Komponente
 (1b) mit der ersten Komponente auf einer der
 Temperatursenke (2) abgewandten Seite wärmeleitend
30 verbunden ist.

11. Laserelement nach Anspruch 10,
dadurch gekennzeichnet, daß
erste Komponente (1a) und zweite Komponente (1b) aus
5 einem identischen Basismaterial bestehen und sich nur
durch eine Dotierung unterscheiden.
12. Laserelement nach Anspruch 10 oder 11,
dadurch gekennzeichnet, daß
10 erste Komponente (1a) und zweite Komponente (1b) als
ein monolithischer Festkörper ausgebildet sind, wobei
wenigstens eine parallel zur Temperatursenke (2)
verlaufende Dimension des Festkörpers größer ist als
dessen senkrecht zur Temperatursenke gemessene Dicke.
15
13. Laserelement nach Anspruch 12,
dadurch gekennzeichnet, daß
der Festkörper eine streifenförmige oder barrenförmige
Geometrie aufweist.
20
14. Laserelement nach einem der Ansprüche 10 bis 13,
gekennzeichnet durch
eine reflektierende Schicht (3) zwischen Festkörper
und Temperatursenke (2).
25
15. Laserelement nach einem der Ansprüche 10 bis 14,
gekennzeichnet durch
eine reflexmindernde und/oder abriebfeste Schicht (1c)
auf einer der Temperatursenke (2) abgewandten Seite
30 des Festkörpers.

16. Laseranordnung mit

- wenigstens einer Lichtquelle zum Erzeugen eines Teilstrahls (S),
- 5 • einem Laserelement, insbesondere nach einem der Ansprüche 9 bis 15, mit einer Temperatursenke (2) und einer ersten Komponente (1a) mit einem laseraktivem Material, wobei die erste Komponente (1a) und die Temperatursenke (2) miteinander wärmeleitend verbunden sind,
- 10 • Mittel zum Einstrahlen von Pumplicht auf eine Eintrittsfläche des Laserelements, dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zum Einstrahlen von Pumplicht so
- 15 ausgebildet und angeordnet sind, dass ein Pumplichtfleck (P) mit einem Verhältnis von Länge zu Breite von wenigstens 2:1 ausgebildet wird, wobei der Pumplichtfleck (P) aus einem einzigen Teilstrahl (S) oder der Kombination von mehreren Teilstrahlen (S)
- 20 besteht.

17. Laseranordnung nach Anspruch 16,

dadurch gekennzeichnet, dass

- 25 • zwischen erster Komponente (1a) und Temperatursenke (2) eine reflektierende erste Fläche, insbesondere als reflektierende Schicht (3), ausgebildet ist und
- die Mittel zum Einstrahlen des Pumplichts eine planare reflektierende zweite Fläche (4') zur
- 30 Faltung des Strahlgangs des Teilstrahls (S) aufweisen, wobei die reflektierenden Flächen (3,4') so angeordnet sind, dass
 - a. die reflektierenden Flächen (3,4')

26

- i. gegeneinander und
- ii. mit, insbesondere einstellbarem, divergentem Verlauf der Flächen (3,4')

5 orientiert sind, und

- b. der Teilstrahl (S) an wenigstens einer der reflektierenden Flächen (3,4') wenigstens zweimal reflektiert wird.

10 18. Laseranordnung nach Anspruch 16,
gekennzeichnet durch
mehrere linear angeordnete Halbleiterlaserdioden (6)
als Lichtquellen,
wobei

- 15
- die Mittel zum Einstrahlen des Pumplichts ein erstes optisches Element (7) und ein zweites optisches Element (8) aufweisen,
 - das erste optische Element (7) jeden Teilstrahl in einer ersten Ebene kollimiert,
 - 20 • das zweite optische Element (8) jeden Teilstrahl in einer zweiten, zur ersten Ebene im wesentlichen senkrechten Ebene kollimiert und die Teilstrahlen (S) so lenkt, dass der Pumplichtfleck (P) durch
- 25
- o ein Aneinanderreihen der Teilstrahlen (S) oder
 - o einen weitgehenden Überlapp der Teilstrahlen (S) definiert ist.

30 19. Laseranordnung nach Anspruch 18,
dadurch gekennzeichnet, dass
das erste optische Element (7) eine Zylinderlinse ist und/oder das zweite optische Element (8) eine Zylinderlinse ist.

20. Laseranordnung nach einem der Ansprüche 16 bis 19,
gekennzeichnet durch
einen Strahlgang, der so ausgebildet ist, insbesondere
5 durch eine Anordnung von Faltspiegeln, dass der
Lasermode mehrfach durch das Laserelement propagiert.
21. Laseranordnung nach Anspruch 20,
dadurch gekennzeichnet, dass
10 der Strahlgang in einem Resonator oder in einen
unidirektionalen Verstärker ausgebildet ist.

1/10

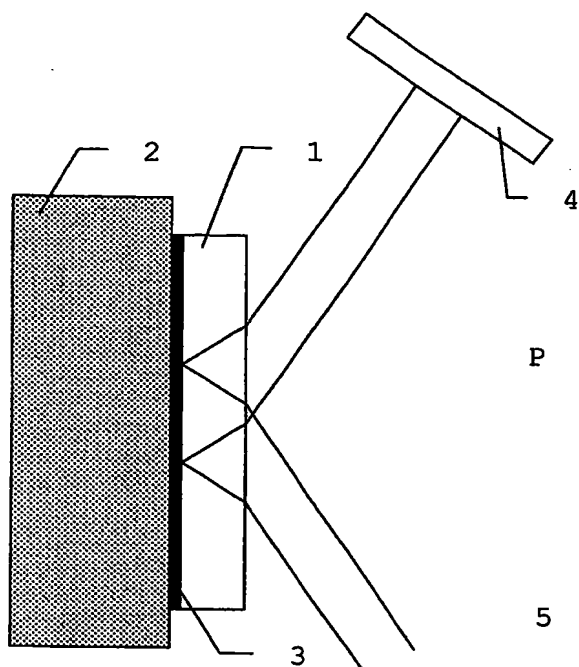


Fig. 1

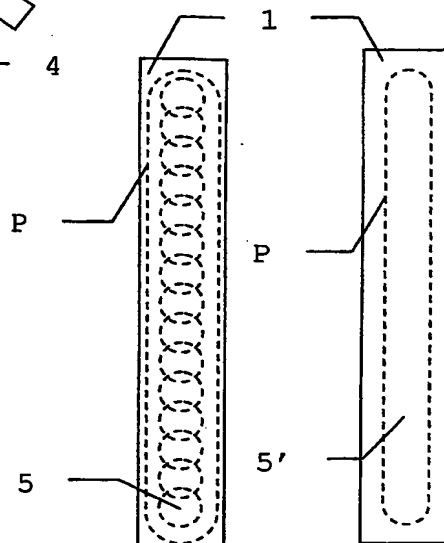


Fig. 2a

Fig. 2b

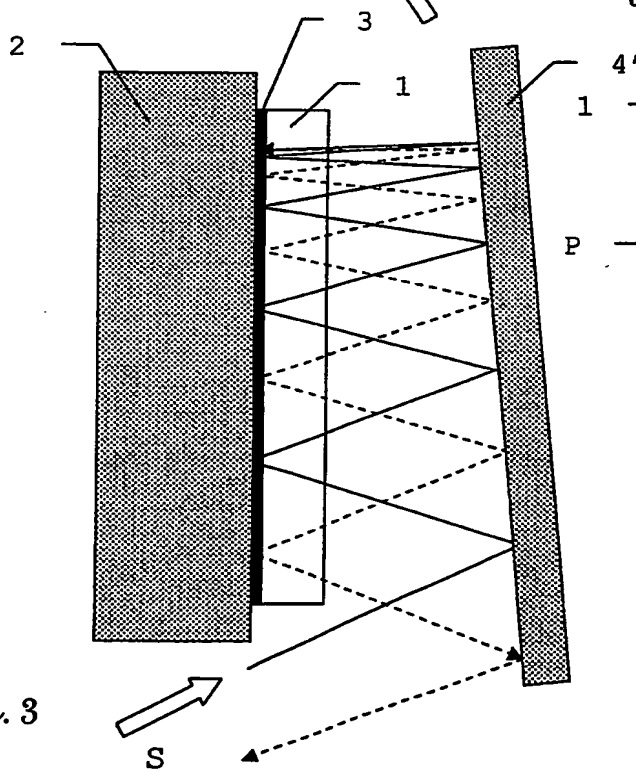


Fig. 3

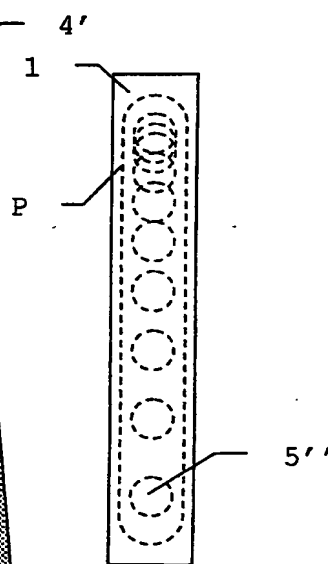


Fig. 4

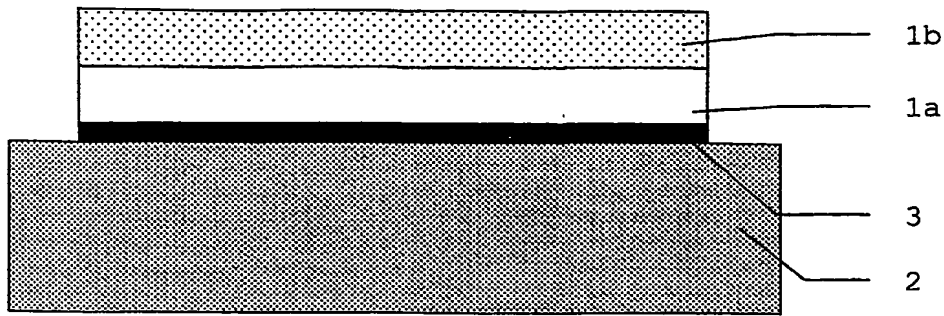


Fig. 5a

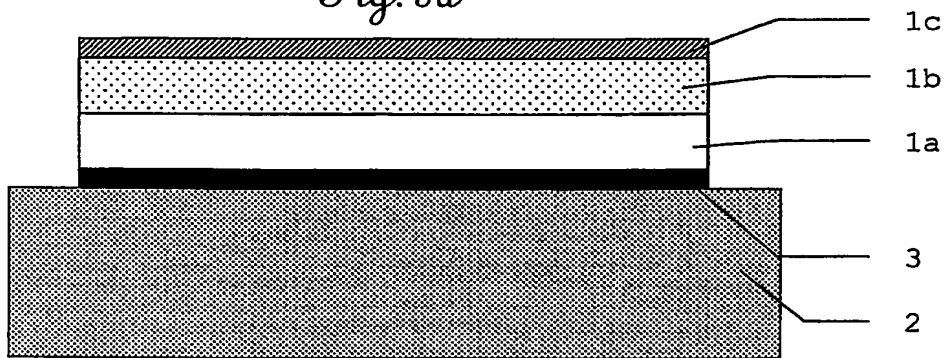


Fig. 5b

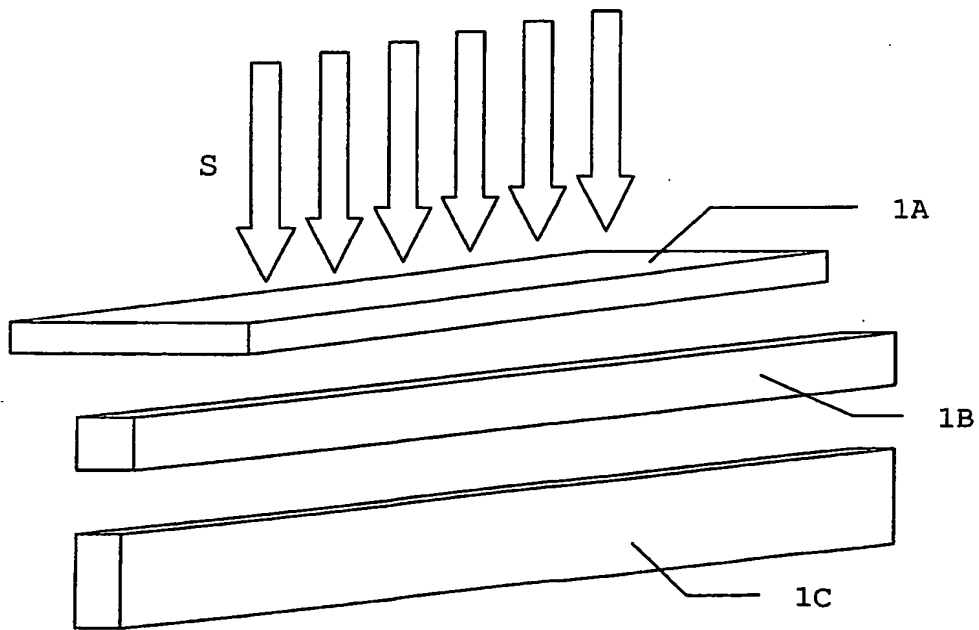


Fig. 6

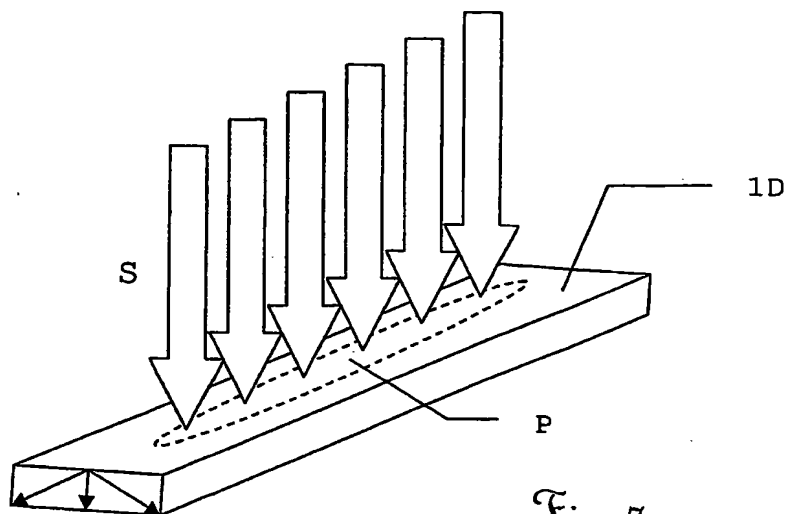


Fig. 7

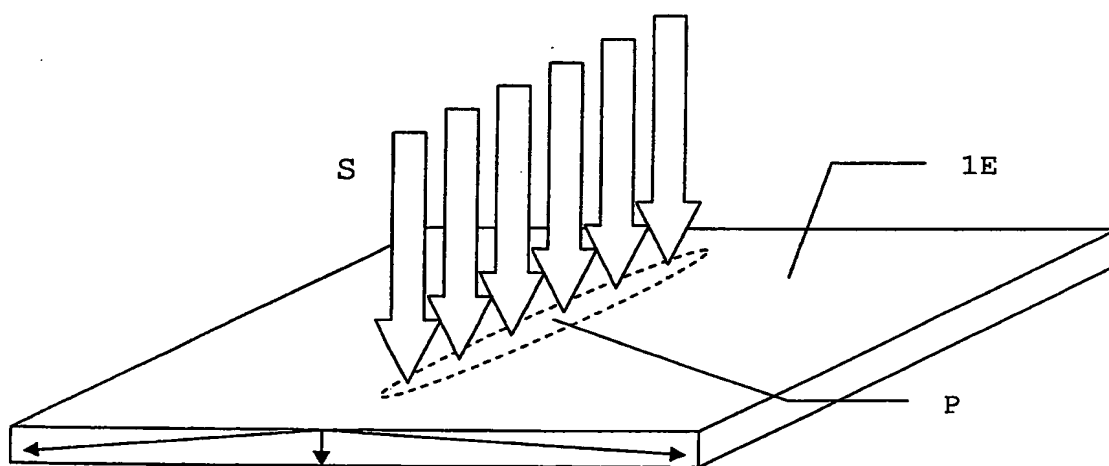


Fig. 8

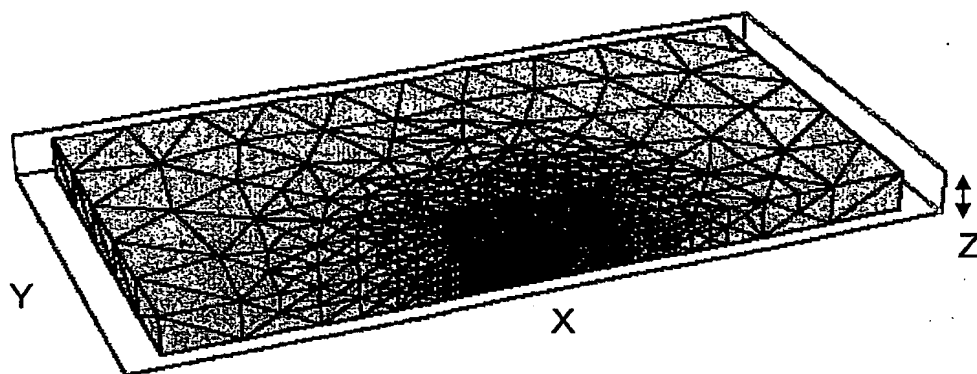


Fig. 9

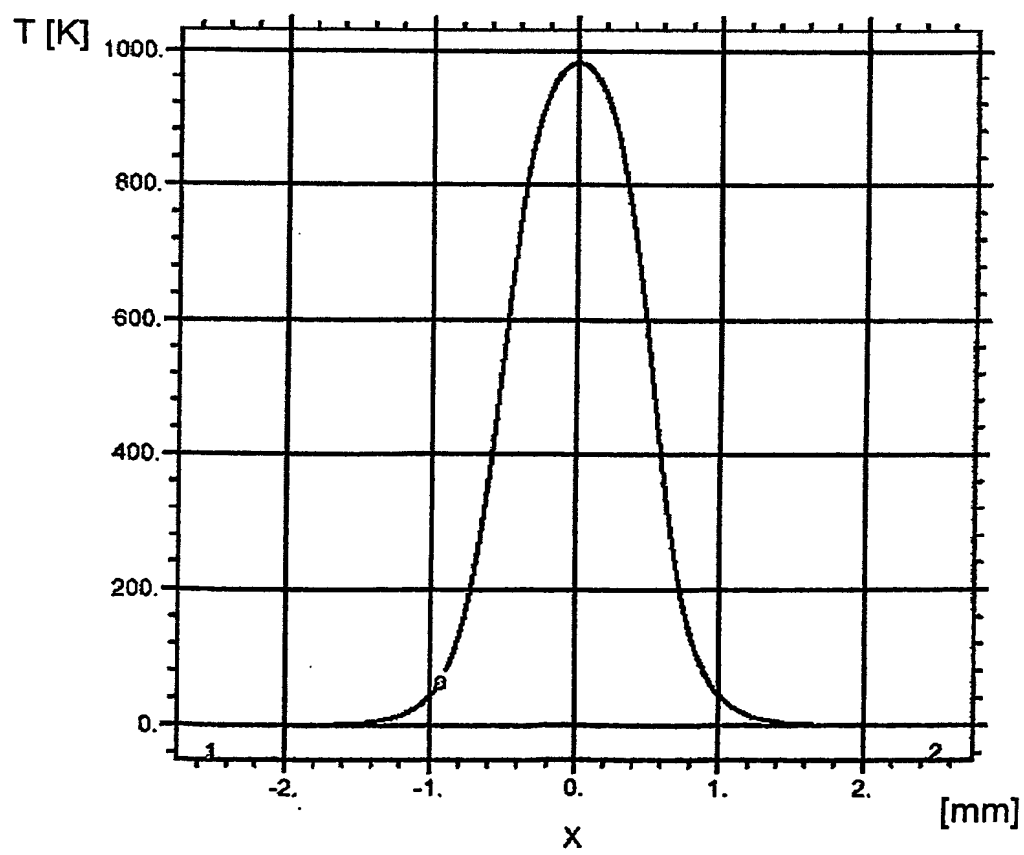


Fig. 10

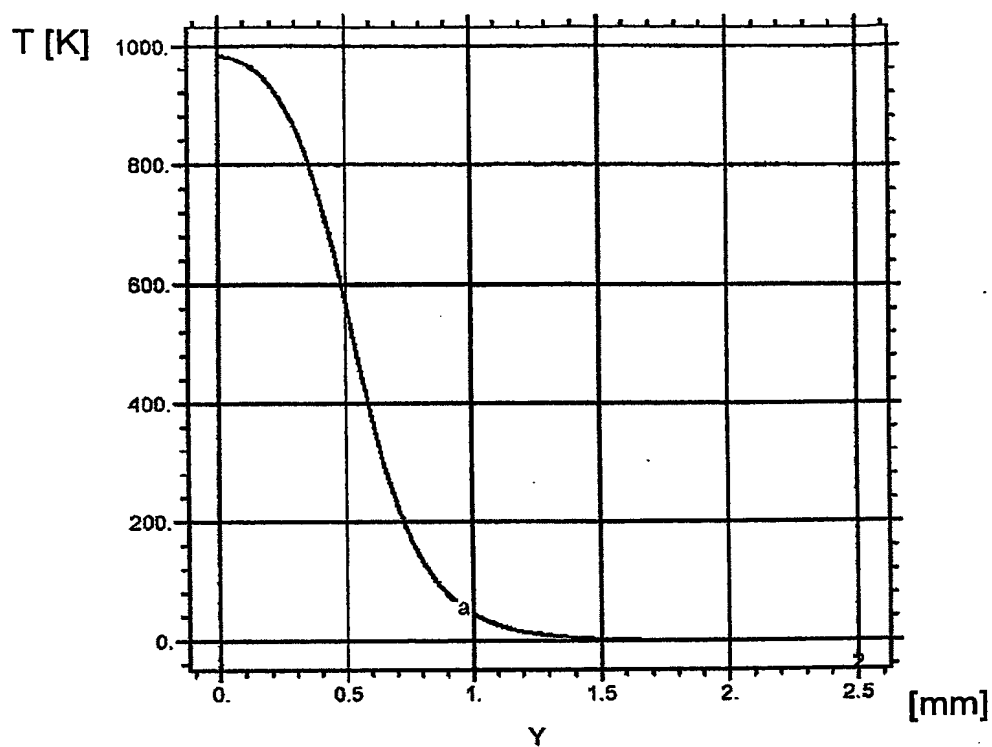


Fig. 11

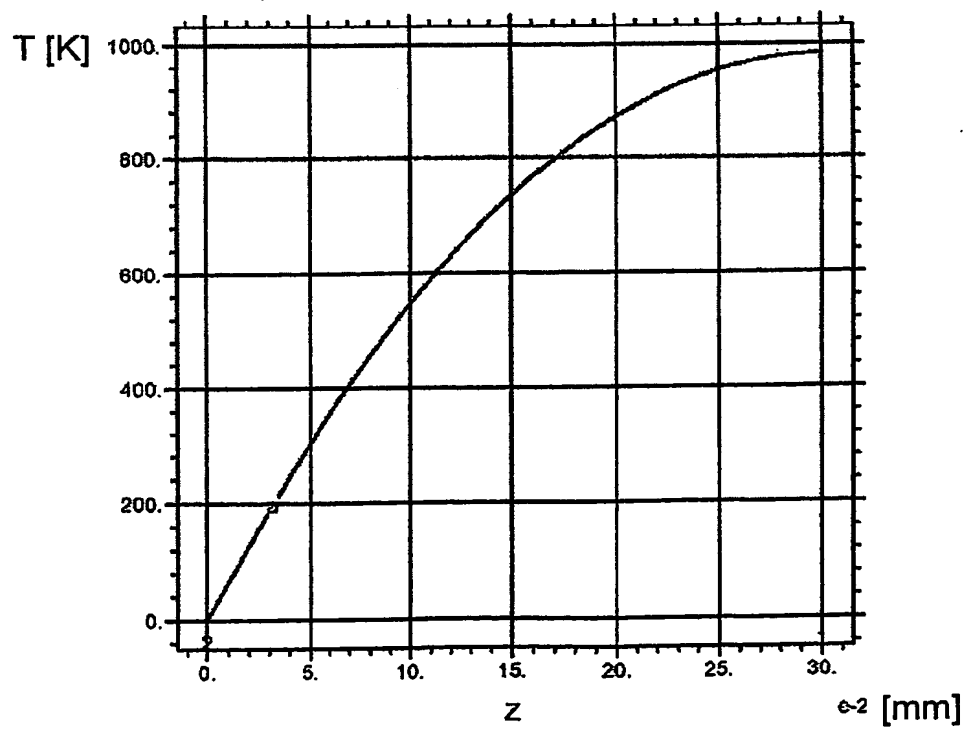


Fig. 12

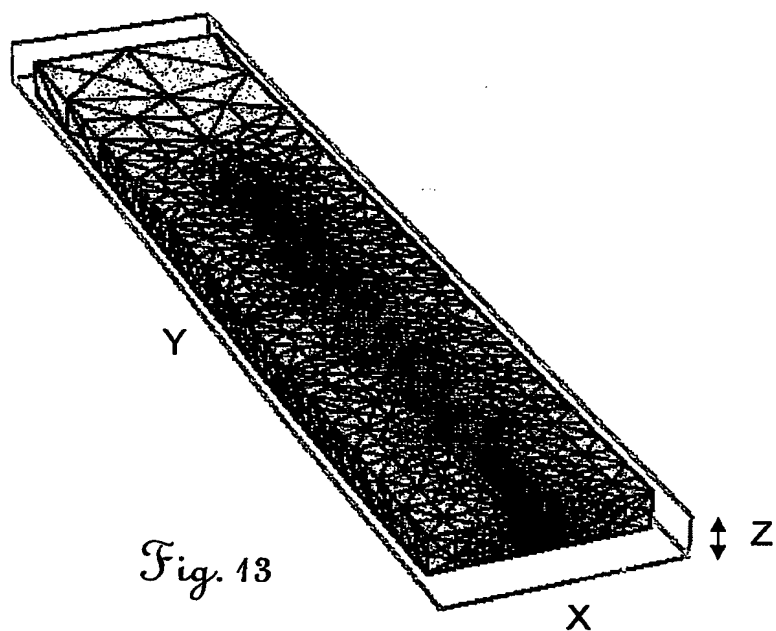


Fig. 13

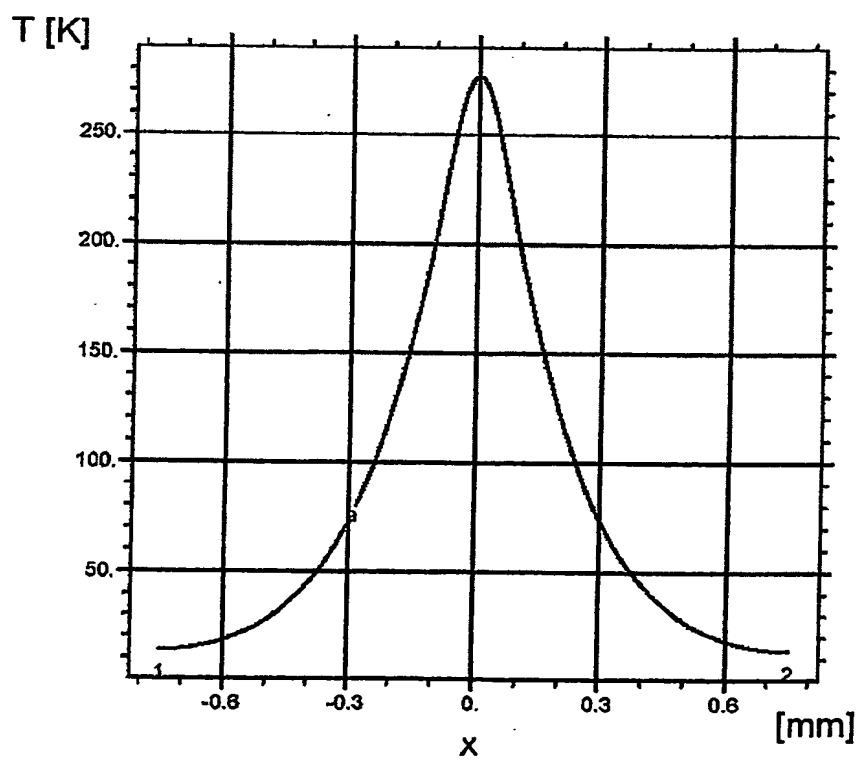


Fig. 14

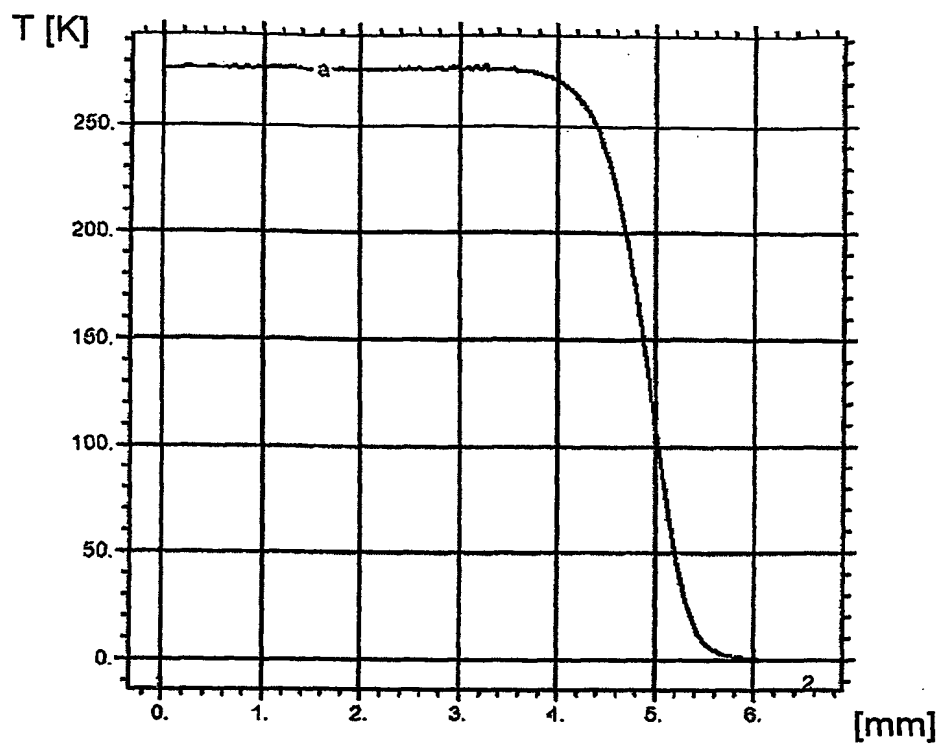


Fig. 15

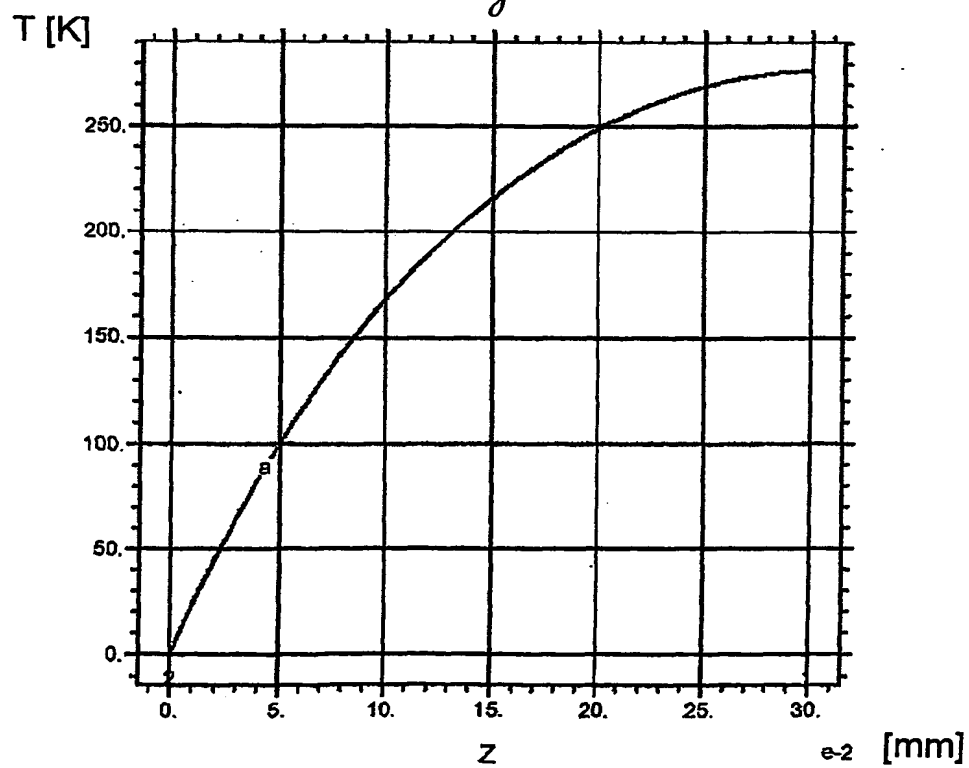


Fig. 16

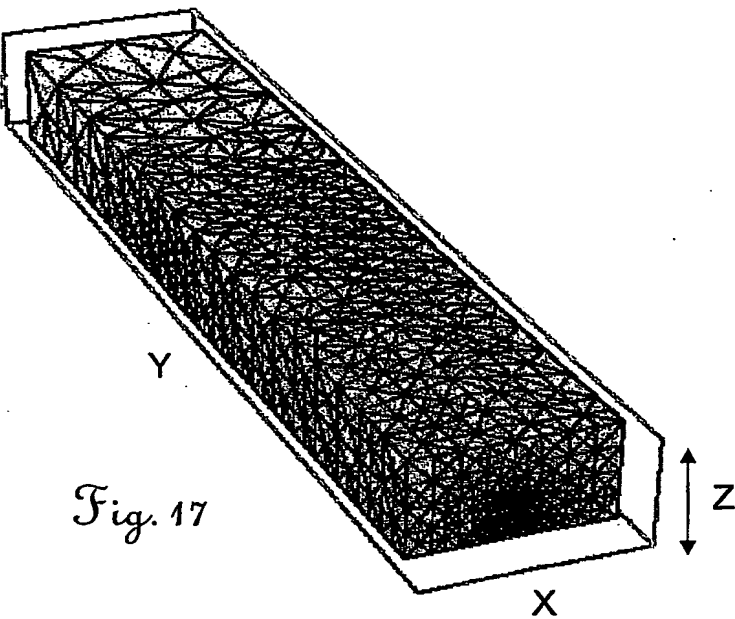


Fig. 17

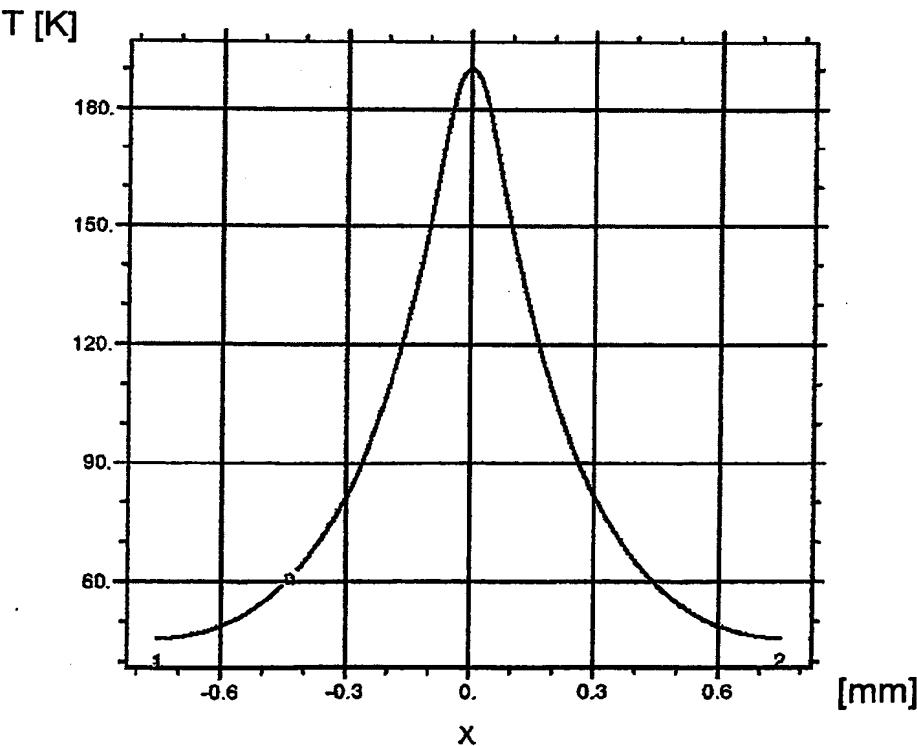


Fig. 18

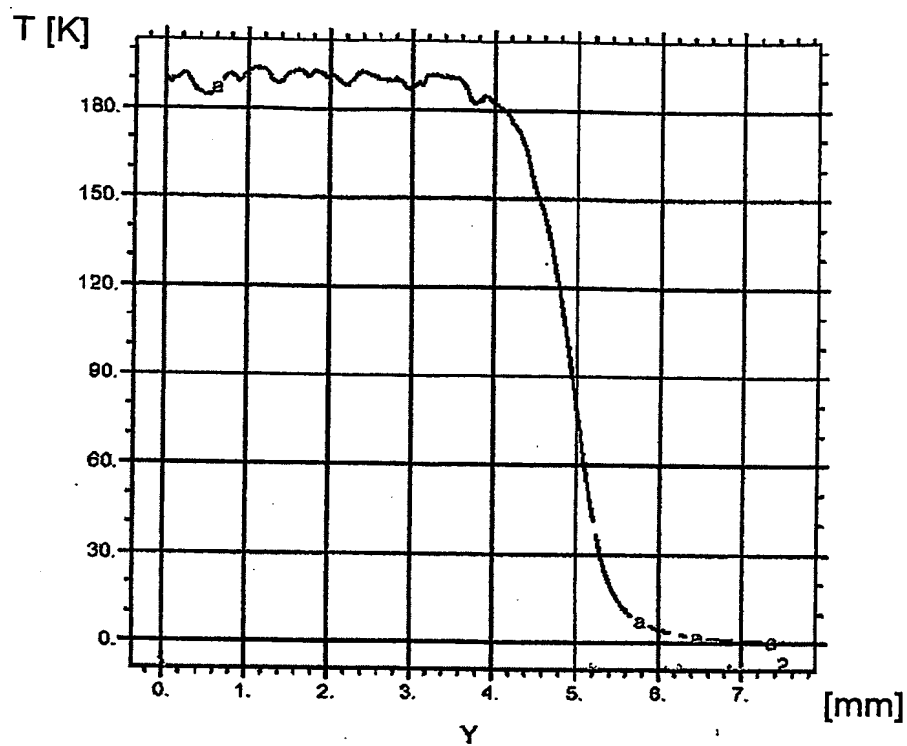


Fig. 19

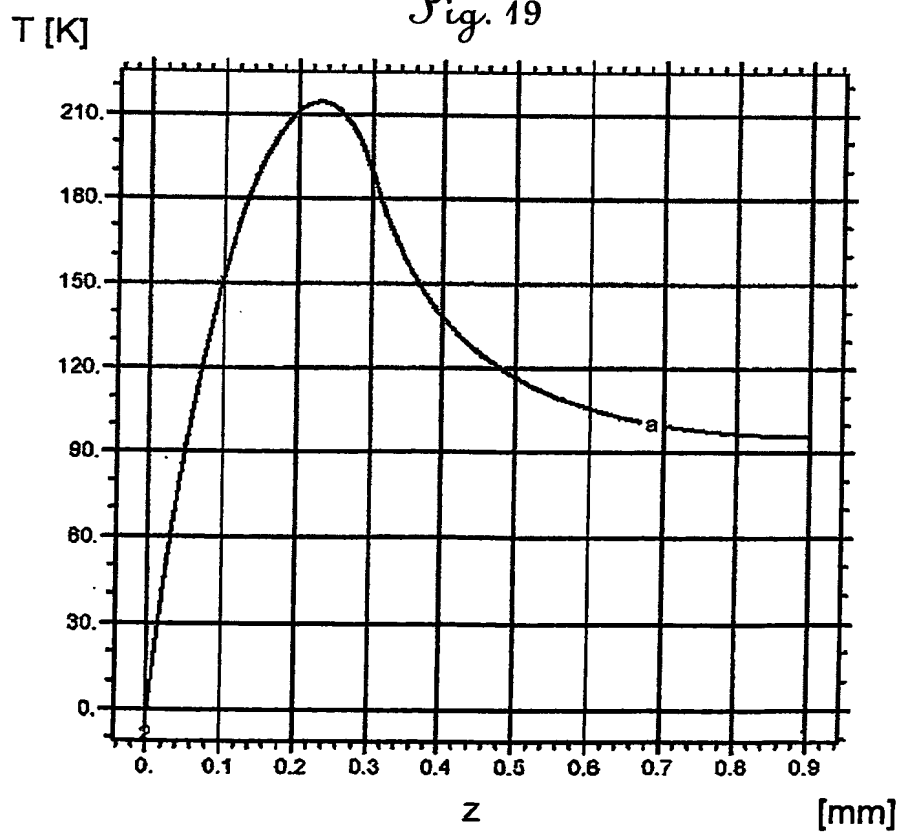
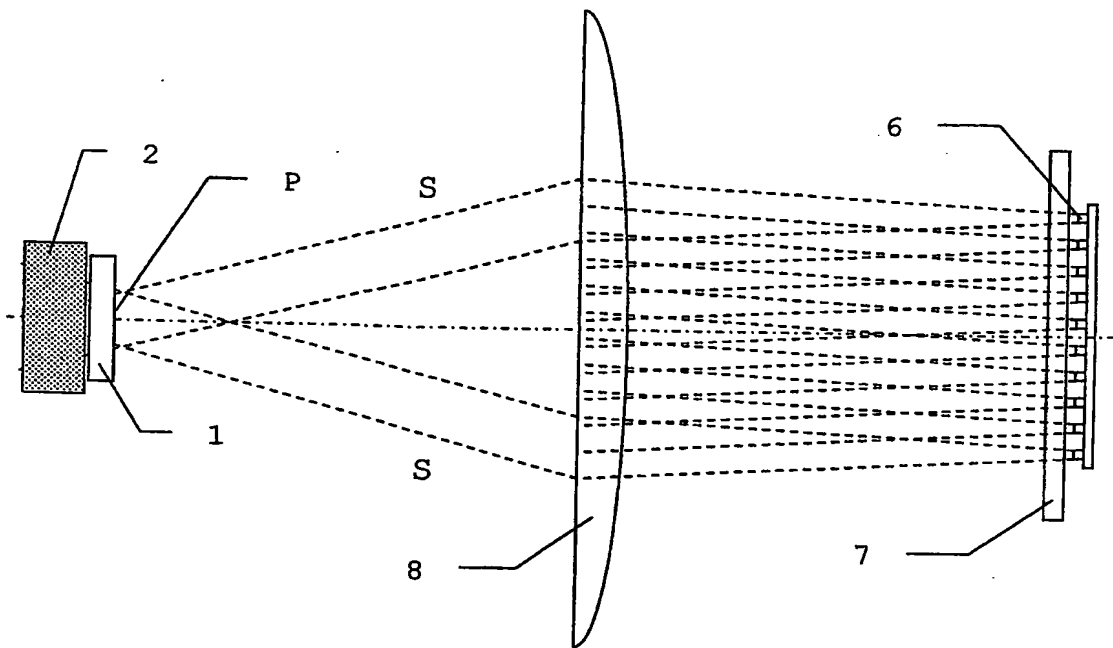


Fig. 20

*Fig. 21*

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.